

GLACIARES DE MARTE

The Martian glaciers

Francisco Anguita (*)

RESUMEN

Marte cuenta no sólo con dos espectaculares glaciares de casquete sobre sus polos, sino también con múltiples signos de flujo de hielo en sus latitudes medias. Muchos de estos flujos glaciares pueden estar relacionados con aparatos volcánicos, y producirse a partir de los volátiles emitidos en erupciones. En otros casos, el estudio de los depósitos glaciares marcianos permite plantear la posibilidad de vuelcos bruscos, de origen caótico, del eje de rotación. Según esta hipótesis, los periodos fríos afectarían alternativamente a las latitudes polares y a las ecuatoriales, una idea que, de confirmarse, llevaría a la conclusión de que las glaciaciones marcianas y terrestres se originan por mecanismos muy distintos. Aun así, la presente deglaciación rápida en ambos planetas permite plantear paralelos interesantes.

ABSTRACT

Mars has two small but outstanding polar glacier sheets, and also abundant traces of present and past mid-latitude glaciers. Many of these could be related to volcanic constructs through volatile species emitted in eruptions. The analysis of Martian moraines suggest also the possibility of chaotic overturns of the rotational axis. Insolation could then take minimum values alternately on high and low latitudes. If this hypothesis is confirmed, we would be lead to think that Martian and Earth glaciations originate through quite different mechanisms. Even then, the present rapid deglaciation on both planets permits an interesting parallel.

Palabras clave: Marte, Geología Planetaria, Glaciología.

Keywords: Mars, Planetary Geology, Glaciology.

INTRODUCCIÓN

Uno de los más sólidos puntos de apoyo de las actuales teorías sobre la formación del Sistema Solar es la distribución de los volátiles, los compuestos de bajo punto de fusión y vaporización. Según vamos alejándonos del Sol, el metal y la roca que predominan en los cuerpos interiores van dejando paso a especies químicas como el agua, el dióxido de carbono, el metano o el hidrógeno, más estables a las bajas temperaturas que (creemos) predominaron en las órbitas exteriores. Excepcionalmente las atmósferas de los planetas gigantes y los océanos subterráneos que parecen existir en buena parte de sus satélites, estos materiales se presentan en estado sólido. El estudio del comportamiento de los diferentes tipos de hielo se ha constituido en una nueva especialidad dentro de la Geología Planetaria: la Criogeología, con sus apartados de Criovulcanismo o Criotectónica, y de la cual la Glaciología sería una subespecialidad encargada de estudiar el flujo del hielo en las superficies planetarias.

En algunos satélites, los materiales arrojados por los volcanes se comportan de manera parecida a los

glaciares terrestres; lo típico, sin embargo, es que las temperaturas superficiales sean demasiado bajas para permitir flujos, de forma que las cortezas de hielo se rompen o se pliegan como las envueltas rocosas de los planetas terrestres. Marte, situado en la frontera del Sistema Solar exterior, es un caso muy especial. Los planetesimales a partir de los cuales se formó contenían, aparentemente, cantidades importantes de volátiles de punto de fusión moderado, esencialmente agua y CO₂, suficientes para formar una atmósfera e incluso una hidrosfera transitoria. Sin embargo, la baja gravedad marciana, una tercera parte de la terrestre, es insuficiente para retener una atmósfera, que a largo plazo (en periodos del orden de los 10⁹ años) terminó escapando al espacio empujada por el viento solar, muy enérgico en cuerpos sin campo magnético duradero. Con una atmósfera residual como la presente (7 milibares de presión atmosférica media en superficie), el efecto invernadero sería despreciable, y los volátiles que todavía quedaban en el planeta (en la hidrosfera, p. ej.) se congelaron, en la superficie formando glaciares o en profundidad como permafrost (Fig. 1). Ambos depósitos forman el cuerpo de estudio de la glaciología marciana.

(*) Departamento de Petrología. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense, 28040 Madrid. E-mail: anguita@geo.ucm.es

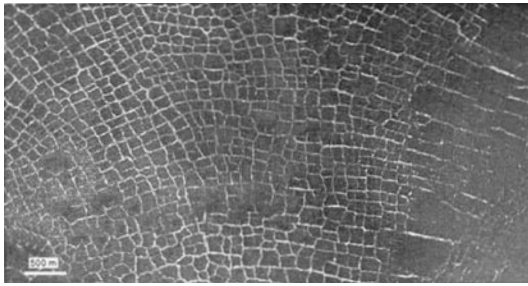


Fig. 1. Huellas indirectas del permafrost marciano: terrenos poligonales en el fondo de un cráter de las llanuras septentrionales. Imagen JPL/NASA.

GLACIOLOGÍA COMPARADA DE MARTE Y LA TIERRA

Las especulaciones sobre el permafrost marciano acabaron en 2002, cuando un espectrómetro de la sonda norteamericana *Mars Odyssey* midió la absorción de neutrones en el subsuelo del planeta, correlacionable con la abundancia de hidrógeno. En buena lógica, grandes cantidades de este elemento sólo se pueden encontrar en moléculas de agua; de ahí la irritación de los geólogos de la NASA cuando, al año siguiente, la Agencia Europea del Espacio (ESA) anunció a bombo y platillo el *descubrimiento* de hielo de agua en el subsuelo marciano. Veremos algún otro roce entre los geólogos de ambas agencias, en parte derivados de la escasa costumbre de los investigadores norteamericanos de no detentar todas las exclusivas sobre el Sistema Solar.

Mientras aguardamos los datos cuantitativos que nos permitan averiguar qué parte de los antiguos mares marcianos están ahora encerrados en el interior del planeta, los glaciares de Marte se nos ofrecen sin restricciones. Una diferencia con la Tierra es que actualmente no parece haber glaciares en movimiento: el planeta está demasiado frío como para que exista una capa líquida basal que sirva como lubricante, y sin ella el flujo glaciar se hace mucho más difícil, salvo en las pendientes muy acusadas. En cambio, abundan las huellas del paso de glaciares (algunos muy recientes), y las soberbias cámaras de las sondas *Mars Global Surveyor* (NASA) y *Mars Express* (ESA) están permitiendo análisis geomorfológicos hasta ahora vedados en Geología Planetaria.

Los casquetes polares

Que Marte tiene casquetes de hielo en sus polos es un hecho conocido desde finales del siglo XIX (exactamente desde 1892, cuando Camille Flammarion los observó por vez primera), y sin duda uno de los datos que alimentaron la leyenda de un planeta habitado. En 1976, los orbitadores de la misión *Viking* pudieron cartografiar estos glaciares polares (Fig. 2), que resultaron espectacularmente desiguales en extensión y composición. Mientras que el hielo que rodea el Polo Norte estaba formado esencialmente por agua (a unos -70°C), el del Polo Sur, a una terrible temperatura de -155°C , tenía que ser de

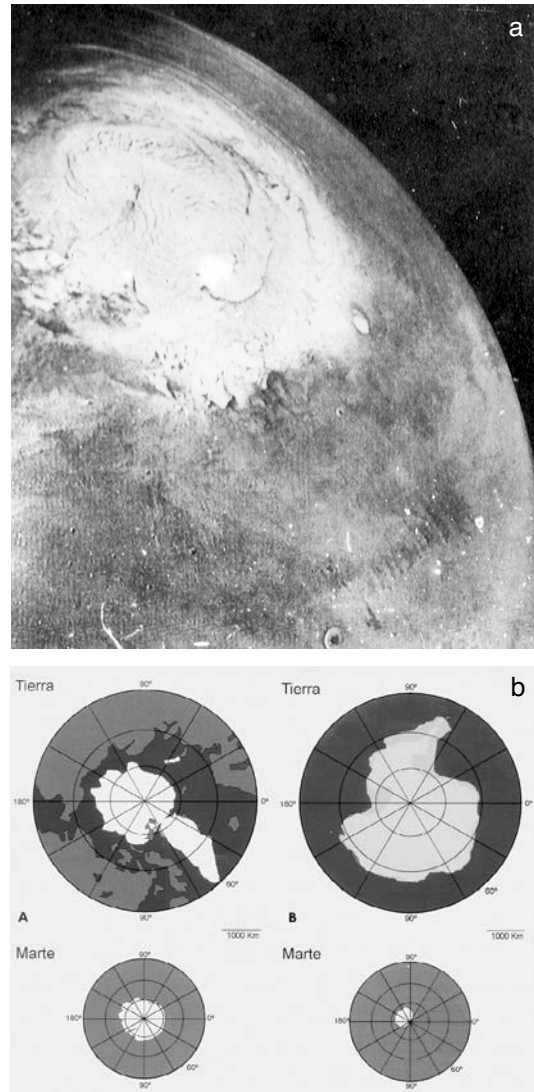


Fig. 2. a) El casquete polar septentrional de Marte, en primavera. El hielo de agua aún está cubierto por hielo de CO_2 , que ya comienza a sublimarse. Imagen JPL/NASA. b) Una comparación de los casquetes polares de Marte y la Tierra.

CO_2 , ya que por debajo de -125°C el dióxido de carbono de la atmósfera tiene que congelarse. Observaciones recientes han permitido precisar que, bajo esta *nieve seca*, en el Polo Sur existe también agua helada. En realidad también el casquete del norte es recubierto en invierno por una escarcha de CO_2 ; probablemente la diferencia entre ambos reside en la menor temperatura media del Polo Sur. A su vez, la explicación de esta diferencia térmica es que la órbita de Marte es muy elíptica (en el afelio está 42 millones de kilómetros —o sea, casi 1/3 de unidad astronómica— más lejos del Sol que en el perihelio) y en el hemisferio sur, además, es invierno durante el afelio.

En los últimos años los datos sobre los casquetes polares se han acumulado a gran ritmo. Ahora sabemos, por ejemplo, que el espesor del casquete meridional sólo llega a los 10-15 metros, una insignifi-

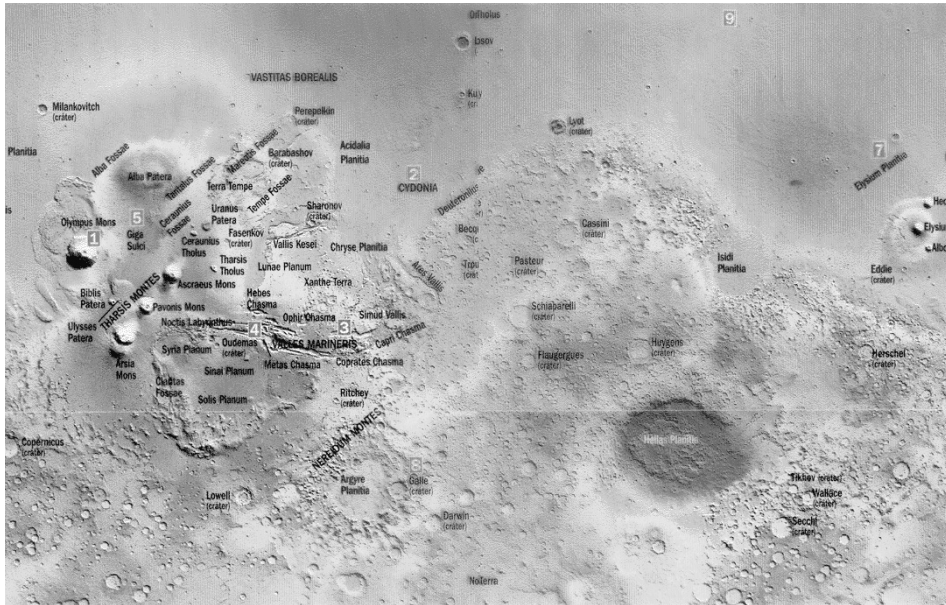


Fig. 3. Mapa de las latitudes medias de Marte con la situación de algunas de las huellas de glaciares, numeradas como las figuras. US Geological Survey.

cante epidermis comparada con los 4 km del hielo antártico. La explicación sobre las desigualdades térmicas podría servir también para justificar esta diferencia: puesto que el hemisferio sur pasa el verano

Uso aquí la palabra tropical en su puro sentido geográfico, ya que Marte nunca ha tenido, que sepamos, un clima tropical. Pero en los últimos años se han multiplicado las huellas de glaciares marcianos extra-polares, que ahora constituyen para los climatólogos planetarios objetos de estudio tan interesantes como los polos. Al igual que en la Tierra, es en las latitudes medias donde encontramos los vestigios de los climas planetarios más extremos, y por tanto donde podemos esperar hallar las claves para reconstruir la historia climática marciana. Una cualidad técnica añade valor práctico a esta consideración científica: cualquier aterrizaje planetario es más fácil cuanto más cerca del ecuador esté el punto de toma de tierra, ya que el ecuador posee la máxima velocidad lineal, lo que facilita el frenado de la nave. Así pues, los glaciares marcianos de latitudes bajas serán zonas clave de la exploración de Marte.

En la Figura 3 se han proyectado algunas de las zonas donde se han localizado glaciares o sus huellas. Por orden de importancia, estos lugares son:

- Las grandes llanuras del norte marciano, que podrían haber albergado un enorme casquete glaciar del que el actual del polo sería sólo un pequeño residuo (Figura 4).
- Las cuencas de impacto, como Hellas o Argyre (Figura 5), que conservan múltiples huellas de haber estado cubiertas de hielo. Igual sucede en muchos cráteres de impacto de todos los tamaños.
- Las laderas de los volcanes (Figura 6), especialmente de los edificios gigantes del domo de Tharsis, por las que parecen haber descendido glaciares de montaña.
- Restos solidificados de grandes inundaciones, procedentes de erupciones volcánicas que fundieron el permafrost (Figura 7).
- Los valles de fondo plano (Figura 8) que desembocan en las llanuras del norte.

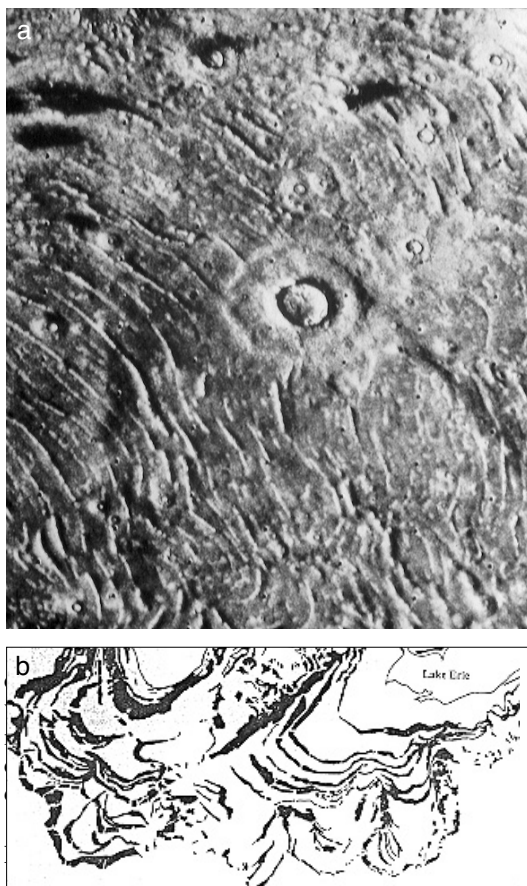


Fig. 4. a) Terrenos con huellas digitales (thumbprint terrains) en la llanura de Utopia (45°N-276°W). Imagen JPL/NASA. b) Análogo terrestre, en la región de los Grandes Lagos. En Kargel et al (1995).

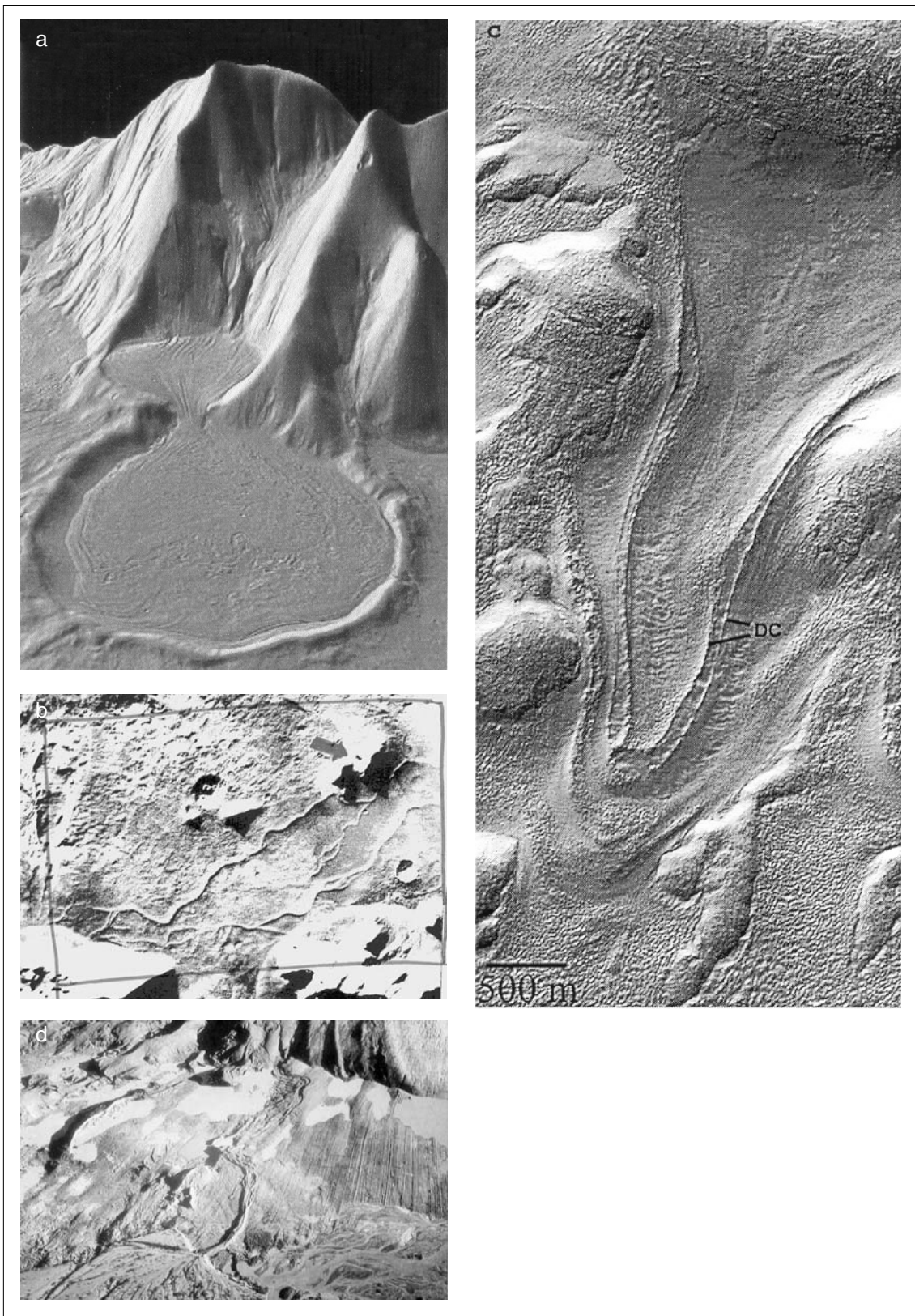


Fig. 5. a) Glaciares rellenando cráteres de impacto en el fondo de la cuenca de impacto de Hellas, a 48°S - 312°W . b) Eskers (cordones de gravas depositados por la fusión de la base de los glaciares en la parte terminal de su recorrido) en la cuenca de Argyre, a 55°S - 42°W . Oceanicum Mons (señalado con una flecha) tiene un gran parecido con los relieves llamados en Islandia mobergs, generados por erupciones volcánicas bajo un glaciar. Fragmento del mosaico JPL/NASA centrado en 55°S - 30°W . c) Análogo terrestre, Alaska. d) Morrenas laterales en la pared interior de un cráter. Imagen Malin Space Science Systems.

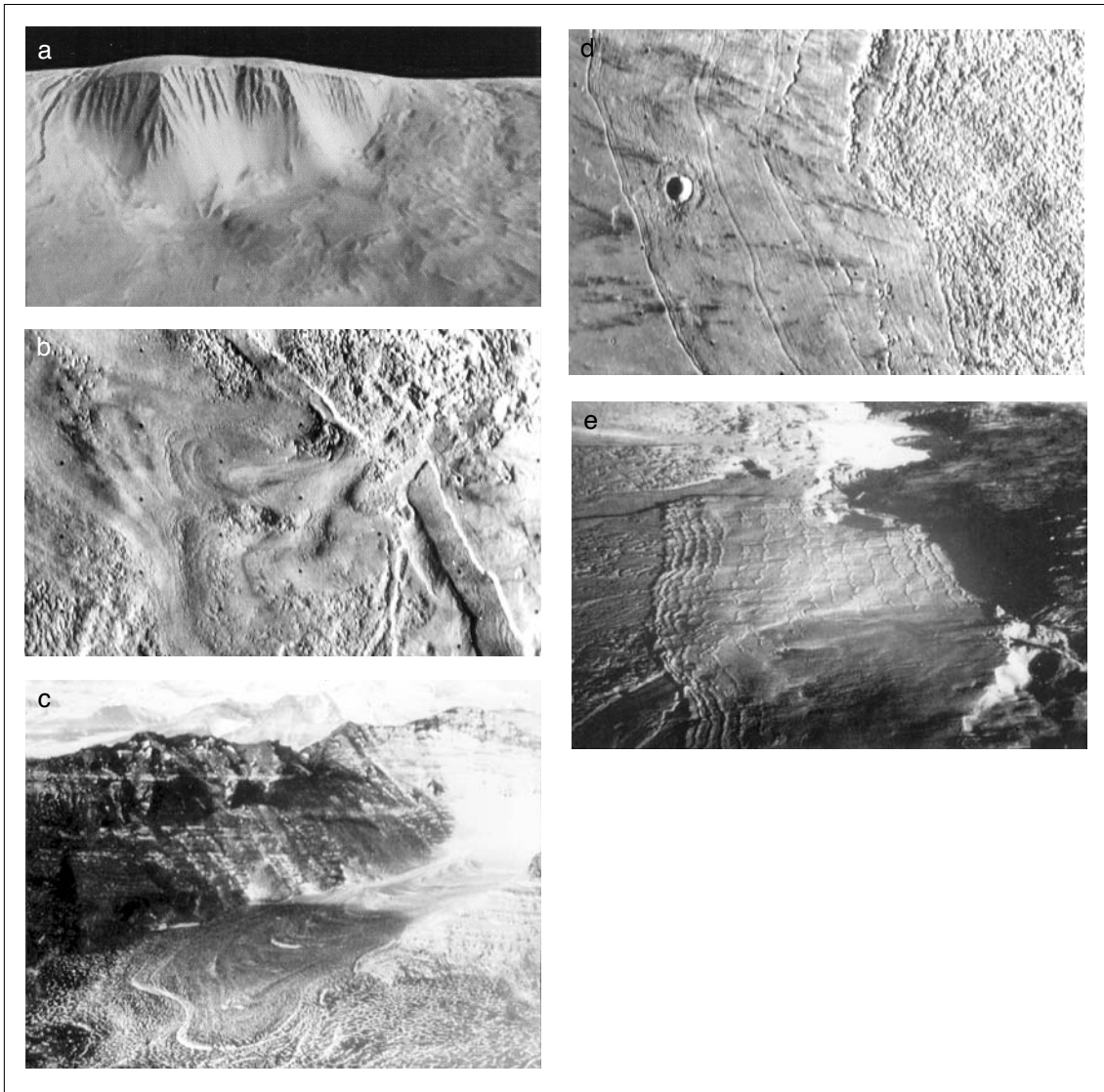


Fig. 6. a) Glaciares al pie del escarpe occidental de Olympus Mons, a 18°N - 138°W . Imagen HRSC Team, ESA. En Neukum et al. (2004). b) Glaciar de roca en la ladera de Arsia Mons, a 5°S - 130°W . Imagen JPL/NASA. c) Análogo terrestre, Antártida. d) Morrenas de retroceso en el frente del mismo glaciar. Imagen JPL/NASA. e) Análogo terrestre, Islandia.



Fig. 7. Posible glaciar formado por congelación de una masa líquida en la que habrían derivado témpanos de hielo. Elysium Planitia a $5,5^{\circ}\text{N}$ - 213°W , cerca de la zona volcánica de Elysium. La interpretación de esta imagen ha causado una polémica entre los geólogos de la NASA y los de la ESA. Para los primeros, se trata de un mar de lava solidificado. Los segundos argumentan que ni los tamaños de las placas ni la pendiente encajan con rocas volcánicas, y defienden (con argumentos convincentes, ver Murray et al., 2005) que se trata de hielo. La discutida estructura ocupa una superficie similar a la del Mar del Norte. Imagen HRSC TEAM, ESA.



Fig. 8. Valles de posible origen glaciar en el terreno grabado (*etched terrain*) de Ismeniae Fossae, región de Arabia Terra, a 40°N-326°W. Imagen JPL/NASA.

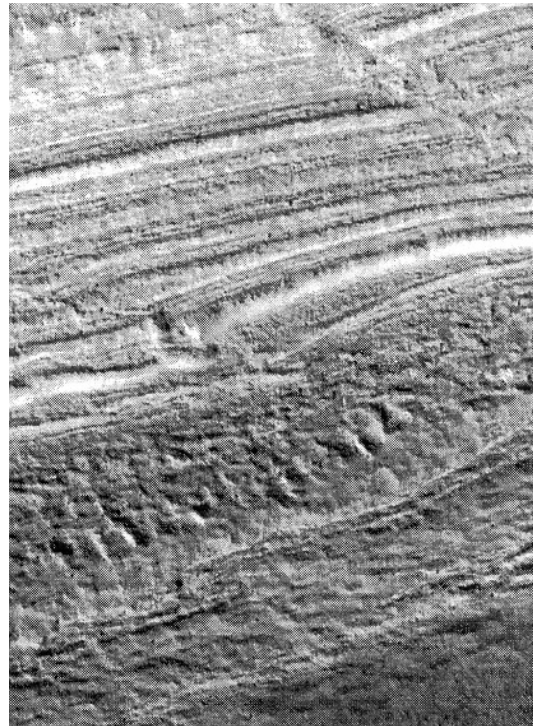


Fig. 9. Los Depósitos Bandeados Polares a 81°N-270°W. El espesor típico de las bandas es de 30 metros. Parte de la serie está cortada por una falla, testimonio de la neotectónica marciana. Imagen Malin Space Science Systems.

LA EVOLUCION CLIMATICA EN MARTE

Los casquetes polares están superpuestos a potentes series sedimentarias de varios kilómetros de espesor, formadas por una mezcla de polvo y hielo. Su origen glaciar es indudable, por lo que parecen los análogos marcianos de las morrenas de fondo que aún cubren buena parte del norte de Europa y Norteamérica. Su característica más visible es una alternancia entre niveles de tonos claros y oscuros (Figura 9), cuya causa se atribuye a una periodicidad orbital, concretamente a la variación en la excentricidad de la órbita marciana que tiene lugar cada 51.000 años. Por esta causa, cada hemisferio recibiría periódicamente más insolación, la turbulencia atmosférica se incrementaría, y el viento depositaría más polvo, mezclado con el hielo. En cierta forma, estos Depósitos Bandeados Polares serían equivalentes a las alternancias terrestres entre calizas y margas llamadas series de Milankovitch: en los dos casos, el aporte de material detrítico fino, polvo o arcilla, se produce a causa de una variación climática inducida por una modulación orbital.

Pero además, los Depósitos Bandeados Polares nos proporcionan importantes informaciones: la primera, que la extensión de ambos casquetes glaciares fue mayor en el pasado; en segundo lugar, que este retroceso ha sido mucho más importante en el Polo Sur; por último, su espesor indica que la actual situación climática ha durado un tiempo considerable. En cuanto a su edad, sin embargo, los casquetes de ambos polos tampoco concuerdan: contando el número

de cráteres de impacto, se llega a la conclusión de que, mientras la edad del casquete meridional oscila entre 7 y 15 millones de años, el septentrional no llega a los 100.000 años.

Estas dataciones tan jóvenes implican un serio problema teórico: si los casquetes polares son un rasgo reciente, estaríamos explorando Marte en un momento excepcional de su historia. Sin que esto sea imposible, repugna al principio de objetividad tan querido a los científicos, según el cual no vivimos ni en un lugar ni en una época peculiares. Una posible salida de esta dificultad es que los casquetes sean formaciones esporádicas, que se hayan originado y desaparecido repetidas veces a lo largo de la historia de Marte. Los datos obtenidos por la sonda *Mars Global Surveyor* podrían interpretarse en este sentido, ya que han permitido registrar un retroceso actual (Figura 10) del casquete polar meridional de hasta 3,6 metros por año marciano (1,88 años terrestres). Si este ritmo no cambia, el Polo Sur marciano estará libre de hielo *en una o dos décadas*. Comentando esta noticia, la revista *Science* del 8 de abril de 2005 titulaba: “Esquíe en Marte...mientras haya tiempo”. Un titular que parece el eco de otros, en otro planeta: “Alarmante repliegue de los glaciares en la Antártida”, o “Los glaciares europeos han perdido un 25% de su superficie en 30 años”.

En este sentido, Marte sí puede considerarse una copia de la Tierra: dos planetas vecinos experimentando a toda velocidad una deglaciación ante los ojos preocupados, o asombrados, de sus habitantes, o ex-

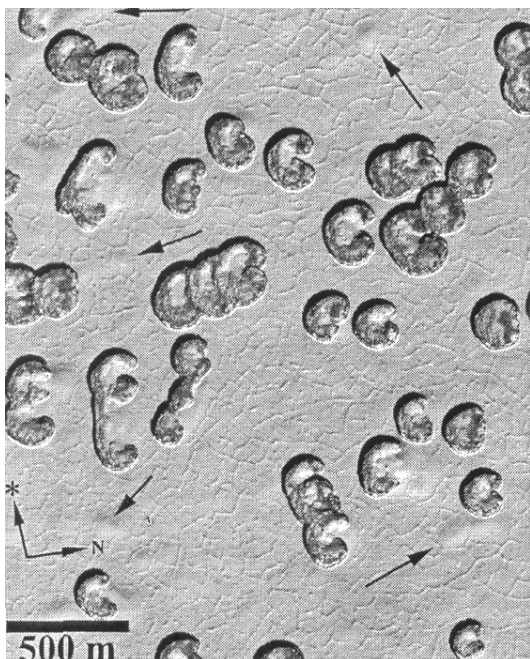


Fig. 10. Pozos de sublimación en el hielo de CO_2 del Polo Sur. Su origen parece estar en depresiones (flechas). La comparación con imágenes tomadas en 1972 ha permitido calcular su progresión anual. Imagen Malin Space Science Systems.

ploradores. El hecho de que en este momento el deshielo marciano afecte especialmente al Polo Sur puede ser coyuntural: la secuencia de sedimentos bajo los Depósitos Bandeados Polares en el norte (Figura 11) indica que hace menos de 10 millones de años era el Polo Norte el que estaba libre de hielo. Y precisamente es en este intervalo de edad en el que se sitúa la mayoría de los glaciares de las latitudes medias, lo que ha abierto la puerta a una idea revolucionaria: quizá el eje de rotación marciano experimenta variaciones rápidas y de gran envergadura. Su oblicuidad actual es de 23° , igual que la de la Tierra, pero con oblicuidades por encima de 35° los polos se convierten en las zonas de mayor insolación (uno cada medio año marciano), mientras que el ecuador sería la zona más fría. Quizá el mayor aval de esta hipótesis es que los astrónomos la habían previsto hace años, al considerar que muchos ejes de rotación planetarios deben experimentar por sistema tumbos caóticos.

Si estas ideas se confirman, las glaciaciones de Marte serían diferentes a las terrestres sobre todo en su distribución geográfica. En la Tierra ha habido glaciaciones polares asimétricas (la silúrica y la permo-carbonífera), polares simétricas (la neógena, aún en desarrollo), y globales (las de la *Tierra Blanca* vendiense). Las marcianas, en cambio, serían o polares o bien tropicales. En cuanto a su desencadenante, la distribución continental, el efecto invernadero provocado por los volcanes, y quizá la influencia de la biosfera parecen los principales candidatos a responder de los periódicos enfriamientos del clima terrestre (ver el artículo "Las causas de las glaciaciones", en este mismo número). En Marte, sólo uno de estos factores parece viable: el vulcanismo, con su capaci-

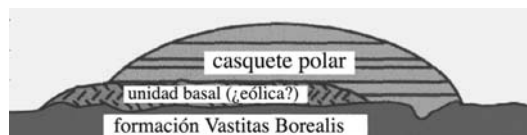


Fig. 11. Corte geológico ideal bajo el casquete polar septentrional de Marte. La Unidad Basal (BU) que aflora bajo el hielo y los Depósitos Bandeados Polares ha sido interpretada como un campo de dunas, y por lo tanto como la prueba de que no había hielo en el Polo Norte en el pasado reciente. La Formación Vastitas Borealis tiene más de 3.000 millones de años. En medio, una tremenda laguna sin datos que comprende casi toda la historia del planeta. En Fishbaugh y Head (2003).

dad de reponer una atmósfera con tendencia a escapar al espacio (Figura 7 en Anguita y Domingo, 2003). Es probable, además, que Marte, al contrario que la Tierra, haya contado con glaciares durante la mayor parte de su historia. Pero estas suposiciones son sólo globos sonda lanzados sobre un arduo problema. Si estamos todavía lejos de comprender la evolución del clima terrestre, la paleoclimatología de Marte es una empresa aún mucho más lejana.

BIBLIOGRAFÍA

- Anguita, F. (1997). *Glaciares marcianos*. Universo, 27-28, 20-25.
- Anguita, F. (1998). *Historia de Marte*. Planeta, Barcelona.
- Anguita, F. y Domingo, M. (2003). *Del cálido Venus a los helados cometas, pasando por las guerras marcianas: algunas claves del Sistema Solar*. Ens. Cien. Tierra, 11, 170-180.
- Arfstrom, J. y Hartmann, W.K. (2005). *Martian flow features, moraine-like ridges, and gullies: Terrestrial analogs and interrelationships*. Icarus, 174, 321-335.
- Fishbaugh, K.E. y Head, J.W. (2001). *Comparison of the North and South polar caps of Mars: New observations from MOLA data and discussion of some outstanding questions*. Icarus, 154, 145-161.
- Fishbaugh K.E. y Head J.W. (2003). *Mars north polar stratigraphy and implications for geologic history*. 6th Intern. Conf. on Mars, 3141.
- Head, J.W., Neukum, G., Jaumann, R., Hiesinger, H., Hauber, E., Carr, M., Masson, P., Foing, B. y Hoffmann, H. (2005). *Tropical to mid-latitude snow and ice accumulation, flow and glaciation on Mars*. Nature, 434, 346-351.
- Kargel, J.S., Baker, V.R., Begét, J.E., Lockwood, J.F., Péwé, T.L., Shaw, J.S. y Strom, R.G. (1995). *Evidence of ancient continental glaciation in the Martian northern plains*. J. Geophys. Res., 100E3, 5351-5368.
- Murray, J.B., Muller, J.P., Neukum, G., Werner, S.C., van Gasselt, S., Hauber, E., Markiewicz, W.J., Head, J.W., Foing, B.H., Page, D., Mitchell, K.L., Portyankina, G. y The HRSC Co-Investigator Team. (2005). *Evidence from the Mars Express High Resolution Stereo Camera for a frozen sea close to Mars equator*. Nature, 434, 352-356.
- Neukum, G., Head, J.W., Basilevsky, A.T., Murray, J.B. y The HRSC Co-Investigator Team (2004). *Recent and episodic volcanic and glacial activity on Mars revealed by the High Resolution Stereo Camera*. Nature, 432, 971-979.
- Thomas, P.C., Malin, M.C., James, P.B., Cantor, B.A., Williams, R.M.E. y Gierasch, P. (2005). *South polar residual cap of Mars: Features, stratigraphy, and changes*. Icarus, 174, 535-559. ■